

공기유량의 변화에 대한 우드펠릿의 자연발화 특성에 관한 연구

김형석¹, 최유정², 최재욱^{3*}

¹부경대학교 대학원 안전공학과, ²부경대학교 대학원 소방공학과, ³부경대학교 소방공학과

A Study on the Spontaneous Ignition Characteristics of Wood Pellets related to Change in Flow Rate

Hyeong-Seok Kim¹, Yu-Jung Choi², Jae-Wook Choi^{3*}

¹Department of Safety Engineering Graduate Student, Pukyong National University

²Department of Fire Protection Engineering Graduate Student, Pukyong National University

³Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University

요약 산업이 발달함에 따라 석탄, 석유등 화석연료의 사용이 증대되고 있다. 그 결과 온실가스의 증가와 더불어 이상기후 등의 문제가 발생하게 되었다. 이로 인해 주 자원을 대체 할 수 있는 친환경적인 신재생에너지에 관한 연구가 활발히 진행 중이며, 그 중 열효율이 높은 우드펠릿이 화력발전소, 가스보일러 등에서 대체연료로서 각광받고 있다. 그러나, 우드펠릿의 사용량은 꾸준히 증대 되고 있는 반면 우드펠릿의 사용 시 발생할 수 있는 화재 및 자연발화 등의 위험성에 대한 선행연구가 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 길이 20 cm, 높이 20 cm, 두께 14 cm의 시료용기를 사용하여 항온조 내부 유량변화에 따른 우드펠릿 최소자연발화온도와 발화한계온도를 구하여 발화특성을 예측하였다. 그 결과 유량이 0 NL/min일 때 153 °C에서 주위온도보다 시료의 중심온도가 상승하여 발화하였고 이때의 발화한계온도는 152.5 °C를 구하였으며, 유량이 0.5 NL/min, 1.0 NL/min에서 발화한계온도인 149.5 °C를 구하였다. 또한 유량이 1.5 NL/min일 때 발화한계온도인 147.5 °C를 구하였으며, 동일한 저장량에서 유량이 증가할수록 발화한계온도가 낮아지는 결과를 도출하였다.

Abstract Uses of fossil fuels like coal and oil increases with industrial development, and problems like abnormal climate come up as greenhouse gas increases. Accordingly, studies are actively conducted on eco-friendly renewable energy as a replacement for the main resources, and especially, wood pellets with high thermal efficiency are in the limelight as an alternative fuel in thermal power stations and gas boilers. However, despite a constant increase in their usage, few studies are conducted on their risks like fire and spontaneous combustion. Thus, this study found the auto-ignition temperature and critical ignition temperature of wood pellets with a change in flow rate in a thermostatic bath, using a sample vessel with 20 cm in length, 20 cm in height and 14 cm in thickness to predict their ignition characteristics. Consequently, at the flow rate of 0 NL/min, as the core temperature of the sample increased to higher than the ambient temperature, they ignited at 153 °C, when the critical ignition temperature was 152.5 °C. At the flow rates of 0.5 NL/min and 1.0 NL/min, it was 149.5 °C, and at the flow rate of 1.5 NL/min, it was 147.5 °C. Consequently, at the same storage, the more the flow rate, the lower the critical ignition temperature became.

Keywords : Wood Pellet, Spontaneous Ignition, Vessel, Flow Rate, Critical Ignition Temperature

1. 서론

현대산업이 발달함에 따라 석탄, 석유등 화석연료의

사용이 증대되고 있다. 그러나, 환경을 고려하지 않은 채 화석연료의 무분별한 사용이 이어졌고 그 결과 대기 중의 CO₂ 농도가 증가하여 지구온난화와 이상기후 등의

*Corresponding Author : Jae-Wook Choi(Pukyong National Univ.)

Tel: +82-51-629-6470 email: jwchoi@pknu.ac.kr

Received February 21, 2019

Revised April 3, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

문제점을 가져왔다.

이에 화석연료가 아닌 대체연료로서 에너지 고갈의 위험성이 적고 환경을 고려한 신재생에너지에 관한 산업이 주목을 받고 있으며 특히 바이오매스와 같은 새로운 대체 에너지의 개발에 관심이 증대되고 있다[1,2].

그 중 우드펠릿은 목재를 가공하는 과정에서 발생하는 톱밥을 분쇄하여 건조 후 압축 성형한 것으로서 발열량은 가공 방법에 따라 최소 4,000 ~ 5,000 kcal/kg이 발생하므로 열효율이 높아 화력발전소, 가스보일러 등에서 대체연료로서 우드펠릿이 각광받고 있다[3].

대체 자원으로 사용하고 있는 우드펠릿에 대한 연구는 활발히 일어나는 반면, 우드펠릿을 사용함에 따라 발생할 수 있는 화재 및 자연발화 등의 위험성에 관한 선행연구가 부족한 실정이다.

자연발화란 아무런 착화원이 없고 공기 중의 상온에서 물질이 스스로 발열하고, 그 열이 장기간 축적이 되고 발화점에 도달하게 되어 연소를 일으키는 현상이다. 또한 외부로부터 화염 · 스파크 등의 착화원에 노출되지 않고 물질을 공기 중에서 가열했을 때 발화점까지 온도가 상승하는 과정이 전반적으로 반응열의 축적에 의한 경우에도 자연발화에 포함 시킨다[4,5].

자연발화에 대한 Jackson[6]은 ASTM Crucible-type 을 이용하여 변형시킨 장치를 사용하여 탄화수소 94개와 상업용 물질 15개에 대해 실험연구를 하였으며, Kadioglu[7] 등은 고체 자연발화에서 석탄의 습분 효과에 관하여 연구하였으며, Thomas[8]는 코르크, 나무 등 셀룰로오스 물질의 반응열로 인한 자연발화 특성에 대하여 연구를 하였다.

자연발화온도에 영향을 미치는 인자로는 용기의 크기, 용기의 모양, 용기의 배치, 용기 안으로 들어가는 공기유동이 있다[9].

따라서 본 연구에서는 우드펠릿을 사용하여 유량의 변화에 따른 자연발화온도 및 최고온도를 구하여 우드펠릿의 사용현장에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 본론

2.1 열발화 이론[10-12]

발화는 크게 자연발화와 인화로 형식을 나누는데, 자연발화는 가연성 물질이 에너지를 받아 스스로 발화점에

도달하여 연소가 일어나는 현상으로 축열 과정에 있는 상태에서 내부에서 방열과 발열 속도의 균형 문제로 발생하고, 인화는 착화원에 의해 연소가 시작하는 현상으로 나눌 수 있다.

열발화 이론은 일반적으로 두 가지로 설명할 수 있으며, 고체에 대한 자연발화는 Frank-Kamenetskii의 열발화 이론을, 액체의 자연발화는 Semenov의 이론을 적용한다.

Frank-Kamenetskii의 열발화 이론에서의 자연발화는 산소의 영향을 받으므로 확산을 고려할 필요가 있으나, 발화한계온도 부근까지는 그 영향이 미미하므로, 산소의 확산과 고체와 기체 간의 열전달은 고려하지 않고, 계 내부의 온도 분포를 고려한 이론이다.

Semenov의 이론은 발열과 열전달(전도, 복사, 대류)에 의한 방열과의 평형 문제를 다루는 이론이다. 계 외로의 방열속도와 화학반응에 의한 발열속도의 차이에 의해 발생하고, Arrhenius형을 참고하여 계 내에서의 발열속도와 Newton의 냉각법칙을 따라 계 외로의 방열속도와 불균형으로 일어나는 한계 조건을 수리학적으로 도입한 것이다.

3. 결론

3.1 실험시료

본 실험에 사용한 우드펠릿은 H 화력발전소에서 열량첨가제로 사용하며, K 회사에서 공급한 것을 사용하였다. Table 1은 KOTITI 시험 연구원에서 제공하는 Test report를 참조하여 시료의 특성치를 나타내었다.

Table 1. Characteristics of wood pellet[13-15]

Test item(s)	Unit	Limit	Test result
Diameter	mm	6-8	8
Length	mm	L ≤ 40	20
Unit volume mass*	kg/m ³	Min. 600	650
Total moisture*	%wt	Max. 10	8.1
Ash***	%wt	Max. 3.0	3.0
Fines	%wt	Max. 2.0	2.0

Gross calorific value	As air dried basis	kcal/kg	Min. 4,300	4,680
	As dried basis		Min. 4,200	4,530
	As received basis		Min. 4,100	4,300
Net calorific value*		%wt	Min. 3,900	3,940
Chlorine***		%wt	Max. 0.05	0.03
Sulphur***		%wt	Max. 0.05	0.03
Nitrogen***		%wt	Max. 0.5	0.5
Hydrogen**		%wt	Report	6.22
Ash fusion temperature		°C	Min. 1,150	1,211
Trace element	As	mg/kg	Max. 1.0	Less than 0.5
	Cd	mg/kg	Max. 0.5	Less than 0.1
	Cr	mg/kg	Max. 10	6
	Cu	mg/kg	Max. 10	5
	Pb	mg/kg	Max. 10	Less than 1
	Hg	mg/kg	Max. 0.05	Less than 0.01
	Ni	mg/kg	Max. 10	3
Zn		mg/kg	Max. 100	12
Biomass**		%wt	Max. 90	95.7
DNA test			Negative	Negative

* As received basis

** As dried basis

*** As Air dried basis

3.2 실험장치[16]

실험장치는 Fig. 1에 나타내었으며 항온조, 열전대, 온도제어장치, 유량계, 온도기록장치, 시료용기로 되어 있다. 열풍 순환식 항온조는 내용적 27 L (길이 30 cm × 높이 30 cm × 폭 30 cm)로 직경이 10 cm인 Sirocco fan을 부착하여 내부의 온도분포를 일정하게 유지하여 내부공기를 순환시켰으며, 항온조의 가열히터는 온도를 최대 1200 °C까지 가열시킬 수 있는 히터(1.5 kW x 5 ea)를 설치하였다. 항온조 상부에 있는 배기구에 팬을 설치하여 릴레이 스위치에 의해 설정온도에 비하여 내부의 온도가 높을 때는 자동으로 팬이 작동되게 하였다. 온도 측정에 사용한 열전대는 시료의 중심온도와 주위온도를

제어하기 위해 사용하였으며, 전자는 2조인 Chromel-Alumel로 된 직경 0.35 mm의 열전대를 시료 용기의 중심부에 설치하였으며, 후자는 항온조의 벽면과 시료용기의 사이에 설치하였다. 온도제어장치는 Konics의 model EC-5600을 사용하여 냉접점을 거친 후의 보정된 온도를 제어하였으며, 이를 설정온도와 비교하였을 때 그 온도 차이에 의해 가열히터 5개의 전류치를 제어하였고, 릴레이 스위치를 사용하여 상부에 부착된 팬의 작동을 on-off 타입으로 제어하도록 하였다. 유량계는 SHIMADZU에서 제조된 model SPG-120S를 사용하여 공기를 유입하도록 하였다. 온도기록장치는 Yoko gawa에서 제조된 펜으로 기록되는 model 4151을 사용하여 설정온도 및 시료중심의 온도를 연속적으로 기록하도록 하였다.

시료용기의 크기는 길이 20 cm, 높이 20 cm, 두께 14 cm로서 직육면체의 형상으로 무한평판에 근접하도록 하였으며, 이 용기는 스테인리스로 된 300 mesh의 망을 사용하여 앞뒷면에 1차원 방향으로 열전달이 되게 하였으며, 그 외의 부분은 약 1 cm로 된 석고판으로 단열을 시켰다.

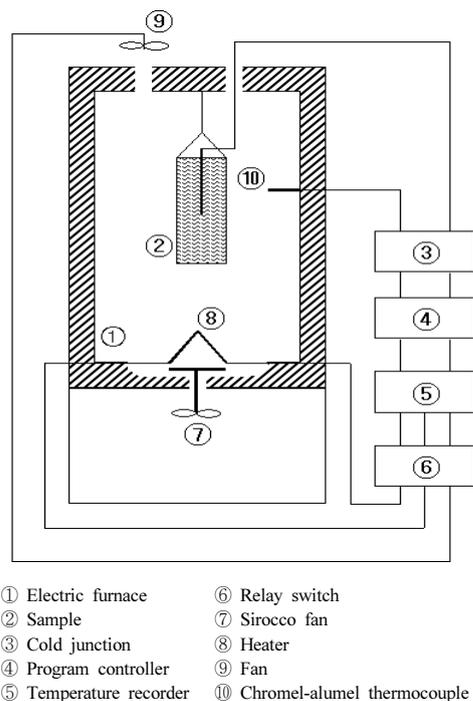


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for spontaneous ignition temperature

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유량이 0 NL/min일 때 자연발화온도

산업현장에서 우드펠릿의 자연발화로 인한 화재의 위험성을 예방하기 위하여 임의의 온도를 정하여 발화되었을 때는 온도를 내리고 비발화 되었을 때는 온도를 상승시키는 방법으로 실험을 반복하여 최저발화온도를 구하였다.

Fig. 2, 3에는 시료의 용기의 두께가 14 cm일 때 공기의 유량을 0 NL/min으로 실험하여 비발화에 대한 결과와 발화에 대한 결과를 나타내었다.

Fig. 2는 152 °C에서 실험을 실시한 것으로 160시간이 경과하여도 발화되지 않았다. 이는 열이 발열속도에 비해 방열속도가 크기 때문에 오랫동안 시간이 지나도 발화하지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 발화되지 않는 온도보다 1도 높은 153 °C에서 실험을 실시한 것으로 주위온도보다 시료온도가 상승하게 되어 발화가 일어났으며 이로 인하여 시료용기 내부의 온도가 급격히 상승하였고, 항온조의 주위온도도 상승하였다. 시간이 지남에 따라 시료의 중심으로부터 연소반응이 종료되어 온도가 하강하는 형상을 나타내었다.

이는 화학반응으로 발생하는 열이 내부에 축적되어 계 내의 온도를 상승시키고 그 결과 반응을 가속화시켜 발화가 일어나는 것으로 사료된다[12].

또한 발화가 일어나지 않은 최고온도인 152 °C와 발화가 일어난 최저온도인 153 °C의 평균온도인 152.5 °C의 발화한계온도를 구하였다.

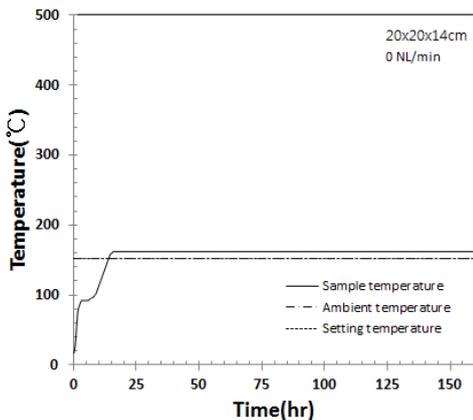


Fig. 2. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 152 °C when the flow rate was 0 NL/min

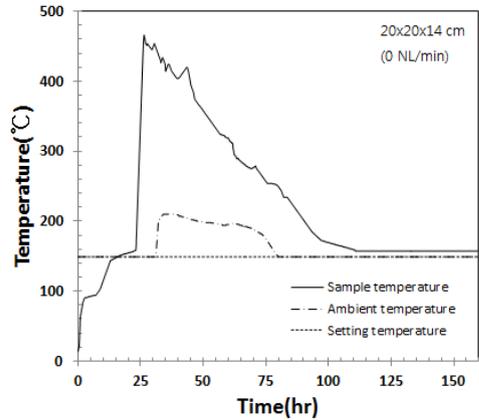


Fig. 3. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 153 °C when the flow rate was 0 NL/min

4.2 유량이 0.5 NL/min일 때 자연발화온도

Fig. 4, 5에는 시료의 용기의 두께가 14 cm일 때 유량을 0.5 NL/min으로 실험을 행한 것으로, Fig. 4는 149 °C에서 비발화 하였으며, Fig. 5는 150 °C에서 발화한 결과를 나타내었다. 또한 발화온도 149 °C와 비발화 온도 150 °C의 평균온도인 149.5 °C의 발화한계온도를 구하였다.

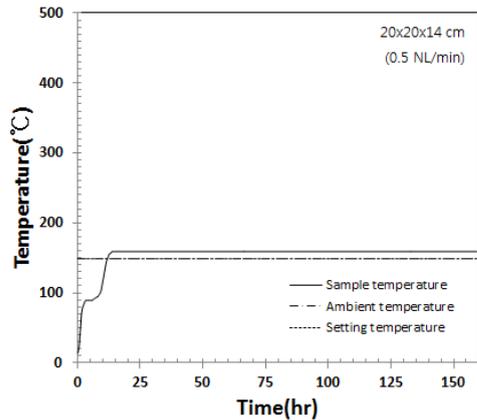


Fig. 4. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 149 °C when the flow rate was 0.5 NL/min

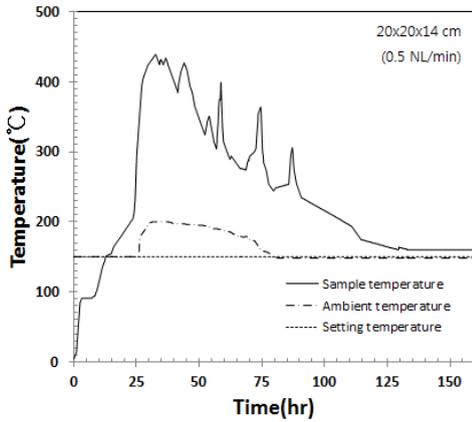


Fig. 5. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 150 °C when the flow rate was 0.5 NL/min

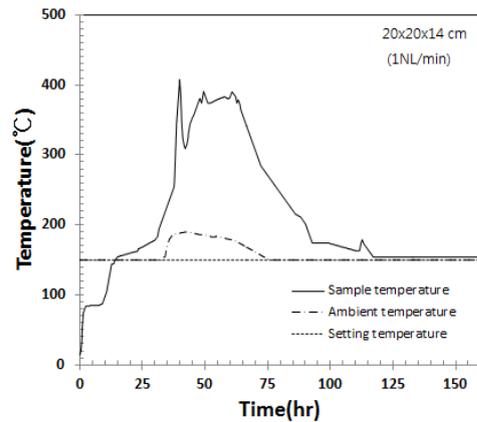


Fig. 7. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 150 °C when the flow rate was 1.0 NL/min

4.3 유량이 1.0 NL/min일 때 자연발화온도

Fig. 6, 7에는 시료의 용기의 두께가 14 cm일 때 유량을 1.0 NL/min으로 실험을 행한 것으로 Fig. 6은 149 °C에서 비발화 하였으며, Fig. 7은 150 °C에서 발화한 결과를 나타내었다. 또한 발화 온도인 149 °C와 비발화 온도인 150 °C의 평균온도 149.5 °C의 발화한계온도를 구하였다.

시료용기 내 온도가 서서히 상승 후 낮아졌다 재상승하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 시료용기 중심에 삽입되어 있는 열전대 부근의 시료가 발화 후 산소부족으로 인하여 연소반응이 약화되어 온도가 하강하다 인접시료에서 재발화하여 온도가 재상승한 것으로 예측된다[17].

4.4 유량이 1.5 NL/min일 때 자연발화온도

Fig. 8, 9에는 시료의 용기의 두께가 14 cm일 때 유량을 1.5 NL/min으로 실험을 행한 것으로서, Fig. 8에는 147 °C에서 비발화된 것을 나타내었고, Fig. 9는 148 °C에서 발화한 결과를 나타내었다. 또한 발화한 147 °C와 비발화한 148 °C의 발화한계온도는 147.5 °C로 측정하였다.

본 실험에서 각각의 유량의 변화에 따른 자연발화온도는 시료 용기의 내부로 공기를 주입시키면 불균일한 흐름을 가지는 공기의 유동이 생기고 이 유동이 용기 내부의 시료에 분산됨으로써 시료 중심의 풍부한 산소와 반응이 용이하여 자연발화온도는 감소하고 발화지연시간은 증가하는 것으로 예측된다[18].

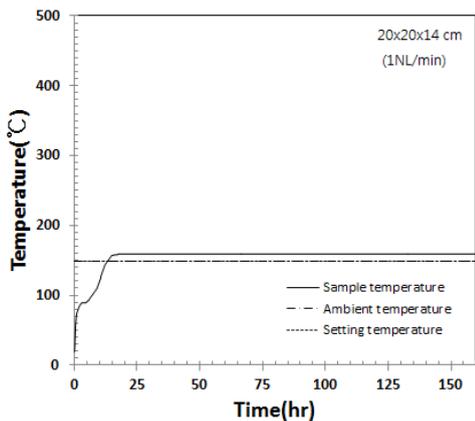


Fig. 6. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 149 °C when the flow rate was 1.0 NL/min

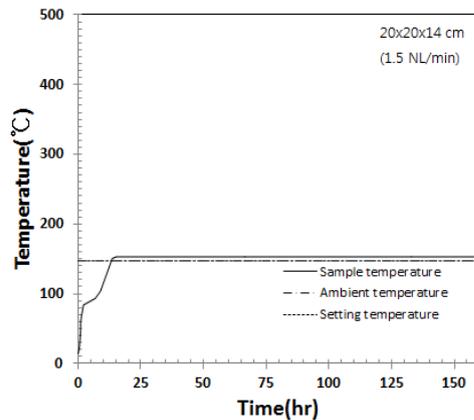


Fig. 8. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 147 °C when the flow rate was 1.5 NL/min

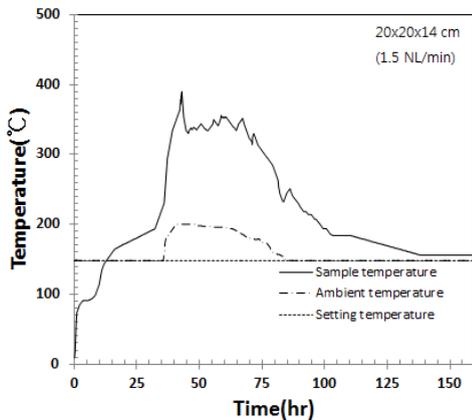


Fig. 9. The relationship between the temperature and time of wood pellets with a 14 cm vessel at 148 °C when the flow rate was 1.5 NL/min

4.5 유량의 변화에 따른 자연발화온도

Fig. 10은 Fig. 3, 5, 7 및 9의 발화에 대한 실험 결과를 나타낸 것으로 유량이 0 ~ 1.5 NL/min으로 증가할수록 발화 온도는 낮아지고 있다.

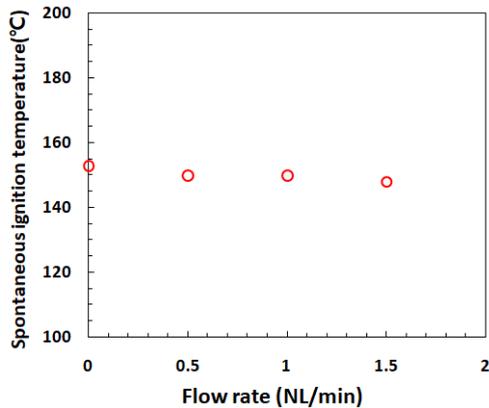


Fig. 10. Relation between flow rate and spontaneous ignition temperature for wood pellet in 14 cm vessel

5. 결론

용기의 길이가 20 cm, 높이 20 cm, 두께 14 cm 일 때 유량의 변화에 대한 우드펠릿의 자연발화온도를 측정 한 결과를 다음과 같이 구하였다.

- 1) 유량이 0 NL/min에서 152 °C의 설정온도에서는 160 시간이 경과되어도 발화가 일어나지 않았으

나, 발화되지 않은 온도보다 1 °C 높은 온도에서는 주위온도보다 시료의 중심온도가 상승하여 발화되어 평균온도인 152.5 °C의 발화한계온도를 구하였다.

- 2) 유량이 0.5 NL/min 및 1.0 NL/min일 경우 149 °C에서 비발화 되었으며, 150 °C에서 발화가 일어나 발화한계온도는 149.5 °C를 구하였다.
- 3) 유량이 1.5 NL/min에서는 148 °C에 비발화 되었으나, 148 °C에서 발화되어 발화한계온도는 147.5 °C를 구하였으며, 동일한 저장량에서 유량이 0 NL/min에서 1.5 NL/min으로 증가할수록 발화한계온도는 낮아졌다.

References

- [1] Y. H. Park, D. O. Youn, "Applicability of A New Tidal Power System with Reduced Environmental Impact", *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.18, No.12, pp.112-117, Dec. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.112>
- [2] K. S. Shin, H. R. Choi, H. C. Lee, "Topic Model Analysis of Research Trend on Renewable Energy", *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.16, No.9, pp.6411-6418, Sep. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.9.6411>
- [3] S. W. Yoon, H. D. Kang, K. Y. Kang, *Bioindustry and Environment*. p.292-300, Moonumsa, 2010.
- [4] Y. S. Mok, J. W. Choi, "A Study on Autoignition of Granulated Activated Carbon with Change of Ambient Temperature", *The Korean Society of Safety*, Vol.7, No.4, pp.45-53, Dec. 1992.
- [5] Y. J. Park, H. P. Lee, K. C. Goh, Y. S. Eom, "A Study on the Spontaneous Ignition Possibility of Shredded Waste Thermoplastic Elastomer", *The Korean Society of Safety*, Vol.31, No.1, pp.61-65, Feb. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2016.31.1.061>
- [6] J. L. Jackson, "Spontaneous Ignition Temperature", *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.43, No.12, pp.2869-2870, 1951. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie50504a058>
- [7] Y. Kadioglu, M. Varamaz, "The Effect of Moisture Content and Air-drying on Spontaneous Combustion Characteristics of Two Turkish lignites", *Fuel*, Vol.82, pp.1685-1693, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00402-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00402-7)
- [8] P. H. Thomas, *Self-heating and Thermal Ignition - A Guide to its Theory and Application*, America Society for Testing and Materials, USA, pp.56-82, 1972. DOI: <http://dx.doi.org/10.1520/STP32090S>
- [9] B. E. Mitchell, P. C. Jurs, "Prediction of Autoignition Temperatures of Organic Compounds from Molecular ", *J. Chem. Inf. Comput. Sci.*, Vol.37, No.3, pp.538-547, May. 1997.

DOI: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021%2Fci9601751>

- [10] D. A. Frank-Kamenetskii. Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetises. p.5-36, Pleum Press, 1969.
- [11] N. N. Semenov. Chemical Kinetics and Chain Reaction. Oxford University Press, 1935.
DOI: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed012p298.3>
- [12] J. W. Choi, S. G. Jeon. Fire Protection Safety Engineering. p.92-100, Hwasumok, 2018.
- [13] Y. R. Kim, S. R. Lee, Test Report for Wood Pellet, KOTITI Testing & Research Institute, Korea.
- [14] Korea Forest Research Institute, Standards and Quality Standards of Wood Products, Korea.
- [15] Y. J. Choi, *A Study on the Spontaneous Ignition Characteristic of Wood Pellet and Powder used in Mixtures of Thermal Power Plant*, Master's thesis, Pukyong National University of Fire Protection Engineering, Busan, Korea, pp.15-16, 2017.
- [16] H. J. Kang, *A Study on the Autoignition Characteristics of Waste Polyurethane Foam*, Master's thesis, Pukyong National University of Safety Engineering, Busan, Korea, pp.11-13, 2002.
- [17] W. S. Lim, *A Study on the Explosion Characteristics of Hydroxy Propyl Methyl Cellulose dust*, Ph.D. dissertation, Pukyong National University of Safety Engineering, Busan, Korea, pp.84-90, 2005.
- [18] O. G. Penyzkov, "Auto-ignition of Hydrogen-Air Mixture at Nonuniform Flow and Boundary Conditions", *Proceedings of the European Combustion Meeting 2009*, Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Belarus, Space Research Institute, Vienna, Austria, pp.1-3, March 2009.

김형석(Hyeong-Seok Kim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 부경대학교 산업대학원 안전공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 부경대학교 일반대학원 안전공학과 (공학박사 수료)
- 2014년 8월 ~ 현재 : (주) 한국소방 이사
- 2011년 1월 ~ 현재 : 부경대학교 소방공학과 겸임교수

<관심분야>
화학, 기계

최유정(Yu-Jung Choi)

[정회원]



- 2017년 2월 : 부경대학교 일반대학원 소방공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : 부경대학교 일반대학원 소방공학과 (공학박사 수료)

<관심분야>
자연발화 및 화재폭발, 가스안전

최재욱(Jae-Wook Choi)

[정회원]



- 1989년 2월 : 동아대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 동아대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1999년 1월 ~ 2000년 1월 : 일본 산업안전연구소 객원교수
- 1997년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 소방공학과 교수

<관심분야>
위험물질, 가스안전, 화재폭발